



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

环境矿物材料

主 编 董颖博

副主编 林 海 李 冰



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



Metallurgical Industry Press
冶金工业出版社



扫码体验更多
冶金工业出版社精彩阅读

ISBN 978-7-5024-8383-8



9 787502 483838 >

定价 39.00 元
销售分类建议：环境 / 矿物



普通高等教育“十三五”规划教材

环境矿物材料

主 编 董颖博

副主编 林 海 李 冰

北 京
冶金工业出版社

2020

内 容 提 要

本书共分为8章,系统地介绍了环境科学和矿物学领域的交叉学科——环境矿物材料的概念、基本性质、加工和改性方法、结构和性能表征手段,并列举了大量近年来国内外环境矿物材料在环境污染治理中的相关研究成果及应用工程案例。

本书内容丰富、系统性强,具有鲜明的实用性。可作为高等院校环境工程、环境科学、矿物加工工程等专业本科生、研究生的教材或参考书,也可供从事相关专业的科技开发人员和工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境矿物材料/董颖博主编. —北京:冶金工业出版社, 2020. 3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8383-8

I. ①环… II. ①董… III. ①矿物—材料—高等学校—教材 IV. ①P57

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 008575 号

出 版 人 陈玉千

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郭惠兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8383-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2020年3月第1版,2020年3月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.75印张; 332千字; 209页

39.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

环境矿物材料是涉及环境学、矿物学、材料学、工程学、物理学、化学等多个学科的交叉、渗透和融合，可以定义为由矿物及其改性产物组成的与生态环境具有良好协调性或直接具有防治污染和修复环境功能的一类矿物材料。因此，环境矿物材料不是一类新的特殊材料，而是在环境保护观念指导下开发的矿物材料或是矿物材料环境功能的延伸。环境矿物材料由于其优异的性能在水污染治理、大气污染治理、固体废物治理、土壤污染治理与修复等领域得到了广泛的应用，系统了解环境矿物材料基本性能、净化污染机理，通过定向改造拓展其净化功能，将有利于进一步扩大环境矿物材料的应用领域。

本书在查阅国内外大量科技文献资料的基础上，简要地阐述了环境矿物材料的定义、应用现状、发展趋势以及天然环境矿物材料的结构和性能。重点介绍了环境矿物材料的加工、改性和再生方法，结构和性能的代表手段，以及环境矿物材料在水、大气、固废和土壤污染治理的机理、技术及应用案例。本书主要特色如下：（1）在内容上引入了国内外近十年在环境矿物材料领域的最新科研成果，从理论研究上增加了环境矿物材料表征和环境矿物材料去除污染物机理的内容，从实践上增加了工程案例等内容；（2）在体系上遵从“知识要点—基础知识—实际应用—工程案例—理论探究—课后思考”原则，全书逻辑关系明确，融入“递进式”思维模式；（3）教材内容将环境、矿业、材料等学科知识有机融合，突出学科交叉与创新。

在本书编写过程中，参考了国内外许多专家、学者和现场工程技术人员的研究成果，研究生杨越晴、靳晓娜、殷文慧、陶艳茹、薛宇航、张曦日、赵一鸣、江昕昞等提供了各种帮助，中国矿业大学（北京）郑水林教授、北京科技大学唐晓龙教授为本书的审稿人，在此深表感谢。

本书的编写得到了北京科技大学教材建设基金的资助。

由于水平有限，书中不妥之处，恳请同行和广大读者批评指正。

编 者

2020年1月于北京

目 录

1 绪 论	1
1.1 环境矿物材料的定义和分类	1
1.1.1 环境矿物材料的提出	1
1.1.2 环境矿物材料的定义	2
1.1.3 环境矿物材料的分类	2
1.2 环境矿物材料的应用现状及发展趋势	4
1.2.1 污染物净化与矿物资源化	4
1.2.2 环境矿物材料发展趋势	6
思考题	7
参考文献	7
2 天然环境矿物材料的结构、性能与应用	9
2.1 常见天然环境矿物材料的结构与性能	9
2.1.1 黏土矿物材料	9
2.1.2 多孔矿物材料	14
2.1.3 钙质矿物材料	17
2.1.4 镁质矿物材料	20
2.1.5 其他天然矿物材料	23
2.2 天然环境矿物材料的作用	26
2.2.1 表面效应	26
2.2.2 离子交换	27
2.2.3 孔道过滤	27
2.2.4 化学活性	27
2.2.5 纳米效应	28
2.2.6 物理效应	28
2.2.7 其他作用	28
2.3 天然环境矿物材料的应用	29
2.3.1 应用现状	29
2.3.2 存在问题	34
思考题	35
参考文献	35

3 环境矿物材料加工、改性与再生	38
3.1 环境矿物材料超细粉碎与分级	38
3.1.1 超细粉碎	38
3.1.2 精细分级	45
3.1.3 超细粉碎与分级的应用	48
3.2 环境矿物材料的提纯	49
3.2.1 浮选提纯	49
3.2.2 磁选提纯	52
3.2.3 化学提纯	55
3.2.4 其他提纯方法	60
3.3 环境矿物材料改性与调控	60
3.3.1 物理改性与调控	61
3.3.2 化学改性与调控	66
3.3.3 复合改性	72
3.4 环境矿物材料的再生	74
3.4.1 热处理再生	74
3.4.2 化学再生	75
3.4.3 生物再生	76
3.4.4 复合处理再生	76
思考题	77
参考文献	77
4 环境矿物材料的表征	82
4.1 环境矿物材料结构和性能表征	82
4.1.1 材料结构的表征	82
4.1.2 材料性能的表征	83
4.2 常用的表征手段	84
4.2.1 X 射线粉末衍射分析	85
4.2.2 红外光谱分析	86
4.2.3 拉曼光谱分析	89
4.2.4 X 射线光电子能谱分析	90
4.2.5 X 射线吸收精细结构谱分析	92
4.2.6 透射电子显微镜	93
4.2.7 扫描电子显微镜	94
4.2.8 原子力显微镜	95
4.2.9 核磁共振分析	97
4.2.10 比表面积和孔结构分析	98
4.2.11 Zeta 电位分析	100

4.3 环境矿物材料表征应用实例	101
4.3.1 改性凹凸棒的表征	101
4.3.2 改性钾长石的表征	104
4.3.3 改性有机膨润土的表征	107
思考题	109
参考文献	109
5 环境矿物材料在水处理中的应用	112
5.1 水污染及其处理技术	112
5.1.1 水污染	112
5.1.2 水质指标及检测	113
5.1.3 常用水处理技术	115
5.2 环境矿物材料在水污染治理中的应用	121
5.2.1 水体中物理性污染物的去除	122
5.2.2 水体中氮磷的去除	122
5.2.3 水体中重金属的去除	125
5.2.4 水体中有机污染物的去除	131
5.2.5 工程实例	133
5.3 环境矿物材料处理水体中污染物的机理	133
5.3.1 无机污染物的去除机理	133
5.3.2 有机污染物的去除机理	134
思考题	135
参考文献	135
6 环境矿物材料在大气污染治理中的应用	138
6.1 大气污染及其治理技术	138
6.1.1 大气污染因子及检测	138
6.1.2 大气污染治理技术	140
6.2 环境矿物材料在治理大气污染中的应用	141
6.2.1 颗粒物的去除	141
6.2.2 工业烟气脱硫脱硝	148
6.2.3 VOCs 的治理	157
6.2.4 室内空气环境净化	161
6.2.5 工程案例	164
6.3 环境矿物材料处理大气中污染物的机理	165
6.3.1 吸附机理	165
6.3.2 过滤机理	166
6.3.3 催化机理	166
思考题	167

参考文献	167
7 环境矿物材料在固体废物处理处置中的应用	170
7.1 固体废物特点和处理处置	170
7.1.1 固体废物的特点和分类	170
7.1.2 固体废物处理处置技术	173
7.2 环境矿物材料在处理处置固体废物中的应用	177
7.2.1 城市生活垃圾	177
7.2.2 垃圾填埋场渗滤液	178
7.2.3 其他固体废物	180
思考题	182
参考文献	182
8 环境矿物材料在土壤污染修复中的应用	185
8.1 土壤污染及治理修复技术	185
8.1.1 土壤污染物	186
8.1.2 土壤污染修复技术	190
8.2 环境矿物材料在污染土壤修复中的应用	195
8.2.1 有机污染土壤的修复	195
8.2.2 重金属污染土壤的修复	196
8.2.3 土壤质量的调理	200
8.2.4 工程实例	201
8.3 环境矿物材料修复污染土壤的机理	204
8.3.1 重金属污染土壤的修复机理	204
8.3.2 有机污染土壤的修复机理	205
思考题	206
参考文献	206

本章要点:

本章主要介绍了环境矿物材料产生的背景、定义和分类,并提出了环境矿物材料的发展趋势。通过学习,可以了解环境矿物材料的发展历程和基本类别,从而将其应用到不同环境污染物的治理与资源化中,以实现矿物资源在生态环境领域的有效利用。

1.1 环境矿物材料的定义和分类

1.1.1 环境矿物材料的提出

环境矿物材料是近年发展起来的环境矿物学的重要研究内容之一。第 29 届国际地质大会(1992 年)明确提出环境矿物学这一学科。环境矿物学是研究天然矿物与地球表面各个圈层之间交互作用及其反映自然演变、防治生态破坏、净化环境污染及参与生物作用的科学。叶大年在回顾人类利用矿物的历史时,提出环境矿物学是矿物学几个发展阶段中的必然产物。他还认为矿物的概念要有所发展,指出矿物是自然界中产生或人类非生产目标活动中产生的具有一定化学成分和晶体结构的物质。

进入 21 世纪以来,环境矿物学得到了迅猛的发展,正在引起越来越多的国家和地区矿物学工作者们的重视,环境矿物学的整体研究水平已经进入了新的发展时期,年轻的环境矿物学学科展现出欣欣向荣的发展前景。中国环境矿物学研究基本上与国际环境矿物学研究同步发展。但我国在出版环境矿物学论文集、召开环境矿物学学术会议和建立环境矿物学学术组织等方面略领先于其他国家。例如,在论文出版方面,《岩石矿物学杂志》分别于 1999 年、2001 年、2003 年、2005 年、2007 年和 2009 年,陆续出版了 6 期环境矿物学专辑,共收录环境矿物学论文 176 篇;《矿物岩石地球化学通报》于 2006 年出版了 1 期环境矿物学专辑,同年《Acta Geologica Sinica》出版了 1 期英文版中日环境矿物学论文集,进一步扩大了我国环境矿物学研究的学术影响。在学术交流方面,于 2001 年 5 月在北京大学成功召开了首届全国环境矿物学学术研讨会,于 2004 年 8 月在昆明理工大学召开了第二届全国环境矿物学学术研讨会,2005 年 4 月、2007 年 4 月和 2009 年 4 月,分别在武汉、北京和贵阳召开的中国矿物岩石地球化学学会学术年会上,主办环境矿物学分会场 3 次。在学术组织建设方面,于 1999 年 4 月在中国地质学会矿物学专业委员会设立环境矿物学分会,于 2004 年 3 月在中国矿物岩石地球化学学会成立环境矿物学专业委员会。

20 世纪 90 年代初,日本学者山本良一教授针对人类社会经济活动日益受到资源和环

境的制约,提出了“环境材料”的概念。所谓环境材料,通常是指同时具有实用性能和最佳环境协调性的材料。可见,这与过去只重视材料实用性能的做法形成了巨大不同,环境材料并非指一种具体的材料,而是一大类考虑到资源、能源和生态问题的材料的总称,或者说是环境协调和环境保护的思想指导下进行设计、加工和使用的材料。目前涉及环境保护和人体健康的矿物学研究已发展成独立的分支学科,即环境矿物材料学。2016年12月10日中国科协批准成立中国硅酸盐学会矿物材料分会,标志着矿物材料特别是环境矿物材料的发展进入一个新的时期。

1.1.2 环境矿物材料的定义

环境矿物材料是指由矿物及其改性产物组成的与生态环境具有良好协调性或直接具有防治污染和修复环境功能的一类矿物材料。它既是矿物材料,又是环境材料,是两者的交集。换句话说,环境矿物材料是具有环境协调性或环境功能的矿物材料,或者说是直接来源于矿物的环境材料。按照后者来理解,环境矿物材料也可称之为矿物环境材料。因此,环境矿物材料应该具备的两个最基本特征是:(1)材料本身是以天然矿物或岩石为主要原料;(2)材料具有环境协调性或具有环境修复和污染治理功能。按照这样的理解,环境矿物材料同样不是一类新的特殊材料,而是环境保护观念指导下开发的矿物材料或是矿物材料环境功能的延伸。由于矿物材料种类丰富,而环境功能或环境协调性可以从多方面表现,因此,环境矿物材料也必然有众多种类。

环境矿物材料的诞生,在很大程度上得益于天然矿物所具有的良好基本性能。这种基本性能主要是指矿物天然自净功能,包括矿物表面吸附作用、孔道过滤作用、结构调整作用、离子交换作用、化学活性作用、物理效应作用、纳米效应作用及与生物交互作用等。它是环境矿物学的重要研究内容之一,是利用天然(或改性)矿物有效治理固、液、气三类污染物的环境工程技术。

1.1.3 环境矿物材料的分类

由于环境矿物材料是矿物材料的一部分,所以环境矿物材料的分类也是基于矿物材料的分类而进行分类的。

根据环境矿物材料的特点,环境矿物材料分为如下四大类型:

(1)天然环境矿物材料:指能够直接利用其物理、化学性质用作环境治理与修复的矿物(或岩石)功能材料,如一些膨润土、沸石、珍珠岩、硅藻土、蛭石等;

(2)改性环境矿物材料:指将矿物或岩石进行超细、超纯、改型、改性等加工改造后用作环境治理或修复的矿物(或岩石)功能材料,如超细石英粉、云母粉、高纯超细的高能石墨乳、改性膨润土、沸石等;

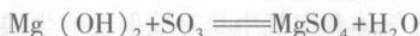
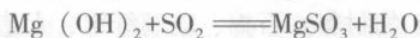
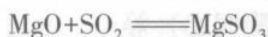
(3)复合及合成环境矿物材料:指以一种或数种天然矿物或岩石为主要原料,与其他有机和无机材料按适当配比进行烧结、胶凝、黏结、胶连等复合或合成加工改造所获得的用于环境修复的功能材料,如岩棉、活性炭、陶粒等;

(4)工业废弃物:指选矿尾矿、煤矸石、石棉尾矿,火力发电厂排出的粉煤灰,冶炼产生的废钢渣,化学工业排出的电石渣、硫酸渣、赤泥等一类材料。

根据环境矿物材料的用途可分为治理大气污染的矿物材料、治理水污染的矿物材料、

治理土壤污染的矿物材料和处理放射性污染的矿物材料。

(1) 治理大气污染的矿物材料。有害气体多为酸酐,大部分能溶于水,可用呈碱性的矿物与之发生中和反应,从而吸收酸酐,达到清除废气的目的。这类矿石有石灰石、方解石、生石灰、方镁石、水镁石等。如日本用方镁石、水镁石吸收 SO_2 、 SO_3 废气:



石灰石和生石灰可进行烟道干法脱硫,在 $t=820\sim 1370^\circ\text{C}$ 下,用粒度为 $0.1\sim 2\text{mm}$ 的石灰石或生石灰对含 SO_2 为 $0.1\%\sim 1\%$ (体积分数) 的烟气作脱硫处理,停留时间为 $30\text{s}\sim 6\text{h}$,石灰石、生石灰对废气的吸收容量可达 50% 。

石盐添加进煤和石灰石的沸腾炉内可降低有害气体的生成量。黏土矿物、沸石以及改性后的多孔状物质可作有害气体的吸附剂。

(2) 治理水污染的矿物材料。人类活动对水体造成严重的污染,水体中污染物按性质可分为无机污染物、有机污染物、放射性污染物等。用矿物材料处理废水的主要方法有过滤、中和、沉淀、离子交换、吸附等。处理后水中所含的杂质应达到国家规定的排放标准。

1) 过滤用矿物材料。凡在水中稳定,即不溶解、不电离、不与水发生反应,并保持中性的矿物均可作过滤材料。常用的有石英、尖晶石、石榴石、多孔 SiO_2 、硅藻土等,板柱状矿物和片状矿物不宜单独作过滤用矿物材料。

2) 控制水体 pH 值的矿物。能与水体中的 H^+ 或 OH^- 发生反应并消耗掉的矿物,可起到调节水体 pH 值的作用。方解石、白云石、生石灰、石灰乳、水镁石、方镁石、橄榄石、蛇纹石、长石等矿物可处理酸性水,石英等酸性矿物可处理碱性水。

3) 利用矿物材料的其他性质处理污水。利用矿物的荷电性,与水体中具异号电荷的污染物作用产生凝聚,消除污染。如明矾、绿矾、苏打、生石灰、三水铝石、高岭石、蒙脱石等均具有这种作用。膨润土对清除有机碳效果很好;沸石、蒙脱石、石墨、蛭石、伊利石、绿泥石、高岭石、凹凸棒石、坡缕石、海泡石等具有良好的吸附性和离子交换性,可用于清除废水中的 NH_4^+ 、 H_2PO_4^- 、 PO_4^{3-} 和重金属离子 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{3+} 、 As^{3+} 、 Ni^{2+} 等。海泡石处理含 Ni^{2+} 污水,对 Ni^{2+} 的去除率可达 $85\%\sim 96\%$,优于活性炭吸附剂,且易于再生;凹凸棒石作吸附剂处理印染厂污水,对 Cr 系有机染料的脱除率和脱色率分别可达 84% 和 95% 。软锰矿可用于处理酸性含 As 废水。磁铁矿可去除废水中的颜色、悬浮物和铁、铝等。硫铁矿粉可处理含 Hg 废水。磁黄铁矿可清除 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 As^{3+} 、 As^{5+} 、 Cr^{6+} 等,去除率可达 98% ,符合饮用水标准。海泡石可清除钻井泥浆中的 Pb^{2+} 。

(3) 土壤修复用矿物材料。在土壤污染治理与土壤环境功能修复过程中,环境矿物材料因其具有良好的使用性能和环境协调性等特点,受到了广泛关注。土壤污染治理环境矿物材料目前主要用于固定、降解和去除土壤环境中的重金属和有机污染物。常用的土壤污染治理环境矿物材料包括煤基复合材料及粉质矿物材料、黏土矿物、铁氧化物、磷石灰、活性炭等。

磷酸盐、碳酸盐和硅酸盐材料是常见的土壤重金属修复稳定化材料,常单独使用或几种材料联合使用。磷酸盐材料常作为一种主要的低成本修复材料,被广泛地应用于土壤重

金属的修复中,其对Pb的固定作用非常明显,对Cr、Cd、Cu、Zn等污染土壤的修复也均有报道。主要含磷材料有羟基磷灰石、氟磷灰石、磷酸二氢钙、磷酸氢钙、磷酸钙、重过磷酸钙、过磷酸钙、钙镁磷肥及含磷污泥等。碳酸盐材料作为传统的土壤修复剂,主要有石灰石、碳酸钙镁。硅酸盐材料主要有硅酸钠、硅酸钙、硅肥、含硅污泥、硅酸盐类黏土矿物(沸石、海泡石、坡缕石、膨润土)等。

(4) 处理放射性污染的矿物材料。石棉、玻璃纤维、人造有机纤维以及某些高吸气性矿物可用于吸附、过滤放射性气体和空气中具有放射性的尘埃,沸石等可净化被放射性质污染的水体,软锰矿对放射性元素也有强的吸附作用。

矿物固化法是处理放射性废渣的最有效方法,“固化”包括对放射性元素的永久性吸附、包裹或经反应生成安全性固体物质。如硼砂、磷灰石、石英混合物在1000℃以上熔化后,可制成耐辐射的稳定玻璃体,这种玻璃体可取代过去使用的水泥(抗水性差、易于浸出放射性的物质)和沥青(易老化而造成泄漏),固化放射性废物。

1.2 环境矿物材料的应用现状及发展趋势

环境矿物材料因其对污染物具有良好的表面吸附作用、孔道过滤作用、结构调整作用、离子交换作用等优良性能,在污染治理、环境修复领域具有独特的功能,并且环境矿物材料是与环境协调性最佳的材料,具有处理方法简单、成本低、处理效果好且不出现二次污染等优势,还体现了以废治废、污染控制与废物资源化并行,自净化作用的特色,具有广阔的应用前景。

1.2.1 污染物净化与矿物资源化

环境矿物材料及其制品在污染物净化和资源化中得到了广泛的利用,许多矿物材料经过加工具有选择性吸附有害及各种有机和无机污染物的功能,而且具有原料易得、单位处理成本低、本身不产生二次污染等优点。

环境矿物材料在污染物净化方面的应用具体体现在以下几个方面:

(1) 利用具有孔状结构的如坡缕石和海泡石等处理有机废水。

(2) 利用具有片状结构、良好的分子交换性和强吸附性的如蛭石,作土壤改良剂和重金属污染废水的处理介质。

(3) 利用比表面积大、离子交换性高及吸附性能优良的如蒙脱石、凹凸棒土、沸石等,来处理生活废水、工业废水,去除废水中的重金属离子(如 Ni^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{3+} 等)、有机污染物及磷酸根离子等。重金属废水的传统处理方法有离子交换法、电解法、结合法等。研究表明,用吸附法在去除效率和成本上是有效的,吸附法具有材料来源广、价廉、节能、吸附效率高的特点。

(4) 利用经表面改性的黏土矿物材料处理固体垃圾,可防止二次污染。

(5) 利用膨胀石墨治理大气污染和海洋油类污染。在处理油轮近海原油泄漏时,膨胀石墨清除海面油污的试用效果很好,优于传统的活性炭、棉花吸附和氧化清除等方法。膨胀石墨对重油、润滑油、柴油和汽油的吸附量均高于活性炭。

(6) 利用吸附性强、比表面积大的膨润土、海泡石、坡缕石、高岭土等作为吸附过滤

材料，清洁空气，处理臭气、毒气（ NH_3 、 SO_2 ）之类的有害气体。用沸石制取空气净化剂、冰箱除臭剂，以及养殖场里用于排除动物排泄物所产生的 NH_3 、 NO 、 SO_2 、 CH_4 等有害气体。

(7) 利用环境矿物材料如天然沸石、海泡石、蒙脱石、坡缕石等，在国防工业、核工业、航天工业中治理放射性污染、防毒、防辐射等。

(8) 利用具有体轻、热导率小、耐高温、吸音等特点的沸石、硅藻土、膨胀珍珠岩、蛭石、浮石、海泡石等非金属矿，生产安全健康型生态建材。

环境矿物材料在环境治理中的应用见表 1-1。

表 1-1 环境矿物材料在环境治理中的应用

治理范围	功能	环境矿物材料
水污染治理	过滤 吸附 净化	石英、尖晶石、石榴石、海泡石、坡缕石、膨胀珍珠岩、硅藻土及多孔 SiO_2 、膨胀蛭石、麦饭石等用于化工和生活用水过滤。白云石、石灰石、方镁石、水镁石、蛇纹石、钾长石、石英等用于清除水中过多的 H^+ 或 OH^- ，明矾石、三水铝石、高岭石、蒙脱石、沸石等用于清除废水中有机物和重金属离子等
大气污染治理	中和 吸附	石灰石、菱镁矿、水镁石等碱性矿物用于中和可溶于水的气体，这些有害气体多为酸酐。沸石、坡缕石、海泡石、蒙脱石、高岭石、白云石、硅藻土等多孔物质制作吸附剂吸附有毒有害气体
固体废物处理与处置	吸附 固化	膨润土、海泡石、石膏、浮石、粉煤灰、电石渣
放射性污染治理	过滤 离子交换 吸附 固化	石棉用作过滤材料清除放射性气体及尘埃。沸石、坡缕石、海泡石、蒙脱石等用作阳离子交换剂净化被放射性污染的水体。沸石、坡缕石、海泡石、蒙脱石、硼砂、磷灰石等可对放射性物质永久性吸附固化
土壤污染修复	中和 吸附	膨润土、海泡石、沸石、珍珠岩、石膏、蛭石、高岭土、硅藻土、石灰石、铁锰矿物、浮石、粉煤灰、电石渣等
噪声	隔音	沸石、浮石、蛭石、珍珠岩等轻质多孔非金属矿物可生产用于保温、隔热、隔声的建筑材料

环境矿物材料在资源化应用方面具体体现在以下几个方面：

(1) 大多数工业废渣为可利用的二次资源，如炉渣、粉煤灰、冶金渣、煤矸石、尾矿、赤泥等。这些废弃物的矿物组成绝大部分是非金属矿物，对于此类矿物材料的处理主要是使其二次资源化。例如煤矸石，其成分与黏土相似，可用以生产砖瓦、水泥、轻骨料、砌筑砂浆；含碳量很低的煤矸石可用于生产陶瓷、耐火材料等。

(2) 从矿山废弃物中回收有用组分。在矿产资源开采利用过程中，绝大部分只利用主要矿产，大量的共伴生矿物随矿山固体废弃物被丢弃。因此从矿山固体废弃物中回收有用组分，不仅可以减少废弃物的数量，而且可以获得更多的有用矿物组分，进行资源化利用。例如江西德兴铜矿曾把含铜量低于 0.3% 的矿石作为废石丢弃，为了回收这部分资源，

采用堆浸→萃取→电积工艺提取废石中的铜,该矿 10 多年已处理含铜废石 5500 多万吨,回收铜 14.7 万 t,黄金 11.6t,取得了较好的经济收益。

(3) 生产农业用肥。在粒化高炉矿渣中含有大量的可溶性硅酸盐,容易被植物吸收利用,磨细后可作为农业肥施用。钢渣中含有较高的钙、硅以及锰、锌、铁、铜等多种微量元素,部分还含有磷,在其冶炼的过程中经过高温煅烧,提高了其溶解度,植物吸收较容易,可被用于制备磷肥、硅肥和钙镁磷肥,还可以作为酸性土壤改良剂。

1.2.2 环境矿物材料发展趋势

根据相关报道,环境污染使我国发展成本比世界平均水平高 7%,环境污染和生态破坏造成的损失占到 GDP 的 15%;2015 年环保部的生态状况调查表明,仅西部 9 省区生态破坏造成的直接经济损失占到当地 GDP 的 13%,日益严重的环境污染与生态破坏对我国国民经济和社会发展产生了重大的影响。矿物材料经过几十年的认识和发展,已在环境保护领域呈现很好的社会和经济价值。目前,环境矿物材料在改性、表征及再生方面的研究较多,但主要关注点在于通过化学处理、表面和热处理改性等方式改变矿物的物化性质以获得高性能材料,今后应加强以下几个方面的研究。

(1) 环境矿物材料的结构与性能数据库构建。目前天然或经过改性后的环境矿物材料在环境污染治理工程中得到了广泛应用,但是缺乏其结构与应用领域和环境净化性能之间的关系研究,环境矿物材料的研究开发涉及众多的学科,需要各学科的交叉和协同。由于产业关联及体制等方面的原因,我国矿物材料工业还相对落后,平均技术含量还较低,没有形成系统健全的矿物材料应用体系,还难以满足相关应用领域的需要。今后应通过矿业和环境等学科之间的交叉与融合,基于现有试验室和工程应用大数据,建立我国环境矿物材料应用数据库,以指导环境矿物材料的开发和应用。

(2) 新型多功能环境矿物材料的开发。为了实现资源利用效率最大化,能源消耗最优化以及环境负荷最小化,需要在现有的技术基础上开发出新的环境矿物材料。目前已经开发出的环境矿物材料在环境污染治理领域性能较单一,往往仅对单一污染物具有较好的效果,但是无论是水、大气、固体废物以及土壤等环境要素中,多种污染物同时并存,如无机与有机污染物并存、不同价态离子并存等,因此应在充分认识矿物本身结构和性质的基础上,研究新的改性方法(如无机、有机与生物的复合改性),赋予环境矿物材料同步去除多种污染物的功能。

(3) 环境矿物材料的造粒和再生循环利用研究。环境矿物材料粒度越细,污染物净化效果越好,但是给实际应用带来很多困难,如水处理易于流失、水流阻力大、土壤修复时污染物难于移除等。因此今后应加强环境矿物材料的造粒研究,重点研究不改变材料性能的造粒技术以及污染物移除技术。另外,大多数环境矿物材料在污染治理过程中最终会达到吸附饱和,为了不产生二次污染和解决材料循环利用问题,今后应发展新型矿物材料再生技术。

(4) 环境矿物材料改性和污染物去除基础理论研究。基于矿物的地球化学特性,借助于有机界生物净化环境的理论,开发新的环境矿物材料改性技术,通过更为先进的表征手段研究环境矿物材料的改性机理,同时研究环境矿物材料的性能与污染物去除之间的关系行为规律,为新型环境矿物材料的设计、制备提供依据。

(5) 拓展与其他方法的联用。近年来利用矿物材料的特殊性质来增强其他污染治理方法的效率是一个研究热点,目前已有不少研究证实了这一途径的可行性。如在制膜的过程中加入纳米电气石颗粒可以有效提高膜的亲水性和抗菌性;在二氧化钛光催化降解有机污染物时,加入纳米电气石颗粒可以显著提高二氧化钛光催化降解效率。因此,在未来环境矿物材料在污染治理中的研究应用,拓展矿物材料与其他处理技术联用也将是一个重要方向。

(6) 加强环境矿物材料的应用研究。环境矿物材料的所有工业应用都是利用矿物材料赋有的特殊性质,加强对矿物材料的深入研究,是开发更好、更适用的环境矿物材料的基本保障。我国矿物品种多,资源比较丰富,具有规模化开发环境矿物材料的物质基础。加大研究力度,提高产品的技术含量,扩大环境矿物材料的应用领域是开发高质量环境矿物材料的关键。

思考题

- 1-1 简述环境矿物材料的由来。
- 1-2 说明环境矿物材料的基本特征。
- 1-3 何为环境矿物材料?请举例说明常见的环境矿物材料及其潜在可利用性。
- 1-4 阐述环境矿物材料的分类依据。
- 1-5 与其他环境材料相比,环境矿物材料在环境治理领域的优势有哪些?
- 1-6 概述环境矿物材料的应用现状。
- 1-7 你认为环境矿物材料在污水处理中的应用需要考虑哪些因素?
- 1-8 概述环境矿物材料的发展趋势。
- 1-9 简述环境矿物材料的结构与性能数据库构建的必要性。

参考文献

- [1] 陈丰. 二十一世纪的矿物学 [J]. 矿物学报, 2001, 21 (1): 1~13.
- [2] 陈镇, 向明辉, 蒋鹏, 等. 低品位海泡石的酸热改性及对吸附性能的影响 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2017, 27 (4): 59~63.
- [3] 戴劲草, 肖子敬, 吴航宇, 等. 纳米多孔性材料的现状与展望 [J]. 矿物学报, 2001, 21 (3): 284~294.
- [4] 高瑞平. 纳米材料和技术的研究及展望 [J]. 材料导报, 2001, 15 (5): 6~7.
- [5] 韩跃新. 矿物材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 黄万抚. 矿物材料及其加工工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [7] 黄占斌. 环境材料学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
- [8] 李春生, 吴国霖, 徐传云. 海泡石基催化材料的应用 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2014 (1): 10~12+51.
- [9] 郑水林. 非金属矿物环境污染治理与生态修复材料应用研究进展 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2008 (2): 3~7.
- [10] 鲁安怀. 环境矿物材料基本性能——无机界矿物天然自净化功能 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001,

- 20 (4): 371~381.
- [11] 商平, 申俊峰, 赵瑞华. 环境矿物材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [12] 余志伟. 矿物材料与工程 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
- [13] 张立娟, 孙家寿. 环境矿物材料的研究现状与展望 [J]. 化学与生物工程, 2003, 20 (3): 10~12.
- [14] 郑水林, 孙志明, 胡志波, 等. 中国硅藻土资源及加工利用现状与发展趋势 [J]. 地学前缘, 2014, 21 (5): 274~280.
- [15] 金士威, 赵淑荣, 周威. 氢氧化镁处理含磷废水 [J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34 (8): 19~23.
- [16] Duffy A, Walker G M, Allen S J. Investigations on the adsorption of acidic gases using activated dolomite [J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 117 (3): 239~244.
- [17] 王农, 陈利轩, 杨利娟, 等. 碳酸钙改性高吸水树脂对铜离子的吸附研究 [J]. 现代化工, 2014, 34 (3): 78~81.
- [18] Yuan X L, Xia W T, An J, et al. Removal of phosphate anions from aqueous solutions using dolomite as adsorbent [J]. Advanced Materials Research, 2013, 864~867: 1454~1457.
- [19] 朱润良, 曾淳, 周青, 等. 改性蒙脱石及其污染控制研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017 (5): 697~705.
- [20] 穆启运. 联苯胺被蒙脱石及铝柱层蒙脱石吸附作用的研究 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2001 (1): 59~61.
- [21] 张媛, 王亚娥, 康峰, 等. 钠基蒙脱石对水体中 Cd^{2+} 的大容量吸附实验研究 [J]. 非金属矿, 2015 (2): 74~76.
- [22] 潘永月, 周北海, 马方曙, 等. 印染废水处理厂二级出水的硫自养反硝化脱氮工艺 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (7): 4073~4078.
- [23] 倪浩, 李义连, 崔瑞萍, 等. 白云石矿物对水溶液中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附的动力学和热力学 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (6): 3077~3083.
- [24] 陈森, 吴永贵. 两种天然碳酸盐矿物对废水中 Cd^{2+} 的吸附及解吸试验 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34 (1): 94~98.
- [25] 聂发辉, 吴晓芙, 胡日利. 人工湿地中蛭石填料净化污水中氨氮能力 [J]. 城市环境与城市生态, 2005 (6): 280~282.
- [26] 李晖, 谭光群, 李瑞. 蛭石对汞的吸附性能研究 [J]. 重庆环境科学, 2001 (2): 65~67.
- [27] 鲁安怀. 小学科彰显巨大生命力, 环境矿物学发展前景广阔——写在《岩石矿物学杂志》出版我国环境矿物学专辑十周年之际 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28 (6): 503~506.
- [28] 张其武. 碳酸钙矿物材料用于环境治理的新概念 [J]. 矿产保护与利用, 2018 (4): 93~96.
- [29] 胡锐, 程飞飞, 岑对对, 等. 矿物功能材料的发展现状、问题及趋势 [J]. 矿产综合利用, 2019 (3): 1~6.
- [30] 王永卿, 张均, 王来峰. 我国矿山固体废弃物资源化利用的重要问题及对策 [J]. 中国矿业, 2016, 25 (9): 69~73+91.